开式转子噪声数值模拟与试验研究

卫凯，曹琦，燕群，徐健，薛东文

（中国飞机强度研究所航空声学与振动航空科技重点试验室，710065 西安）

摘　要：为了研究开式转子在低速起飞工况下的噪声特性，运用计算流体力学（CFD）和计算气动声学（CAA）相结合的方法，对开式转子的离散噪声做了数值模拟。采用非线性谐波法（NLH）对开式转子的非定常流场进行计算，非定常分量和叶面定常载荷一同构建类比声源，最后使用FW-H积分法进行远场噪声辐射计算，获取远场多点的噪声频谱结果。搭建了开式转子试验台，使用0°～90°远场指向性阵列测试了指向角区间内的噪声特性结果，并与数值模拟结果进行对比。研究结果表明：干涉噪声是开式转子的主要噪声；关键频率处的数值模拟结果与试验结果趋势基本一致，误差在3 dB以内；所建立的非线性谐波法频域内展开求解非定常扰动量的气动噪声数值模拟方法，可以为开式转子噪声的快速准确预测提供一定的帮助。

关键词：开式转子；噪声；数值模拟；非线性谐波法；试验测试

中图分类号：V235.12　　　　**文献标志码：**A

Numerical simulation and experimental measurement of open-rotor

WEI Kai, CAO Qi, YAN Qun, XU Jian, XUE Dongwen

(Aviation Technology Key Laboratory of Aeroacoustic and Vibration,
Aircraft Strength Research Institute, 710065 Xi'an, China)

Abstract: In order to the study the characteristics of open-rotor noise in low speed, CFD (computational fluid dynamics)/CAA (computing aerodynamic acoustics) hybrid method of the open-rotor tone noise was set up. N-S equation is expanded by NLH method in the frequency domain, and the unsteady components are obtained. These unsteady components and steady load are used to construct Lighthill sound source. Finally, FW-H integration method is used to calculate far-field noise radiation. The noise experimental platform is built and test scheme is designed. The noise directivity in the range of 0°-90° is measured by using the far-field directivity array surround scale prototype. The characteristic of the noise of open-rotor is analyzed by comparing the numerical simulation results and experimental results. The results show that interaction noise is the major component of open-noise. The simulation results are basically consistent with the distribution trend of the experimental results at key frequency, the error is within 3 dB. The numerical simulation method of aerodynamic noise based on nonlinear harmonic method is developed to solve unsteady disturbance in frequency domain, which can provide some help for rapid and accurate prediction of open

收稿日期：2022-04-19　　　　**修回日期：**2022-05-16
基金项目：中国飞机强度研究所基础创新中心项目（No. BYST-CKKJ-22-015）
通信作者：卫凯，工程师。E-mail：weikai.258@163.com
引用格式：卫凯，曹琦，燕群，等. 开式转子噪声数值模拟与试验研究[J]. 应用力学学报，2022，39（3）：476-481.
WEI Kai, CAO Qi, YAN Qun, et al. Numerical simulation and experimental measurement of open-rotor[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(3): 476-481.

rotor noise.

Key words: open-rotor; noise; numerical simulation; non-linear harmonics method; experimental measurement

开式转子发动机兼具涡桨发动机耗油率低和涡扇发动机适于高速飞行的特点。相比于同等推力等级的常规涡扇发动机,开式转子发动机耗油率和CO_2排放可降低 20% ~30%,可为最大马赫数为 0.70~0.85 的民用客机、军用运输机提供动力[1]。随着国际民航组织对发动机环保性要求的进一步提高,以及更加严格的适航条例的出台,开式转子发动机将是下一代民用飞机潜在的动力备选方案之一。开式转子发动机有油耗低的优点,但也因其转子直接暴露于空气中,存在噪声大的缺点。后者是其走向进一步成熟并在商业化应用进程中面临的重要挑战之一[2]。开式转子发动机对转转子很大程度上决定了该型发动机的飞行性能,同时又是整个发动机的主要噪声源;因此,对商业运营和适航条例而言,开式转子的噪声必须控制在一定范围内[3-4]。

目前,国内外控制开式转子噪声的方法主要是通过气动声学设计来加以改善。该方向的研究集中在开式转子气动噪声的产生及传播机制、开式转子的噪声数值模拟与试验测试。文献[5]采用计算流体力学(CFD)与计算气动声学(CAA)相结合的方法对开式转子在起降阶段的频域噪声进行了数值模拟,非定常流场计算采用非定常雷诺平均方法(URANS),噪声计算采用基于 Mohring 的声类比方法。结果表明开式转子的峰值辐射噪声主要集中在低频范围。文献[6]探索了开式转子的几何建模方法,并基于 URANS 方法,针对巡航工况下不同迎角时开式转子的流动特性进行了数值模拟,未对噪声进行分析。结果表明,两级转子间存在明显的气流干涉现象,迎角和两级转子间距是影响开式转子气动特性的关键参数。文献[7]基于 CFD-CAA 的数值模拟方法,利用旋转叶片的周期性,采用单通道模拟了开式转子的非定常流场,提高了流场计算的效率,采用 Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H)[8]预测噪声,计算结果与试验结果吻合很好,并且得出结论,开式转子的噪声幅值主要产生在转子叶片的通过频率及其谐波频率处。文献[9]梳理了 3 个典型的开式转子模型噪声风洞试验,详细分析了离散噪声和宽频噪声对开式转子噪声的贡献程度。结果表明,在低频区域,离散噪声贡献大;在高频区域,宽频噪声贡献更大。然而随着对噪声预计精度的进一步提高,需要刻画更细节的非定常流动,传统的非定常模拟技术 URANS 的计算时间和硬件成本昂贵而难以被工程界所接受。因此,更高效的非定常建模技术一直是 CFD 计算的研究热点[10]。

非线性谐波(nonlinear harmonic,简称 NLH)法是一种建模思想相对简单,精度较高,近年来比较流行的叶轮机械非定常计算方法[11]。该方法的基本思想是将流动分量分解为时均流场和脉动流场,然后在频域内求解确定性应力项,只需要对一个叶片通道生成网格,计算量大幅降低[12-14]。王雷等[15]采用非线性谐波法对对转压气机的两级转子的干涉现象进行了分析。研究表明非线性谐波法可在时均框架内有效计算非定常现象,3 阶谐波已能对在计算成本和计算精度间获得最佳折衷。药晓江等[16]采用非线性谐波法和传统的双时间步法对风扇和涡轮分别进行非定常计算分析。分析表明在相同的计算机硬件条件下,两种方法达到相同的计算精度,非线性谐波法可节省 40% 的计算时间。开式转子存在强烈的级间干涉特征,目前采用 NLH 法计算开式转子的非定常扰动量进而预测噪声的研究还比较少[17]。

本研究将以某典型开式转子为研究对象,基于 CFD-CAA 的数值计算方法对开式转子的离散噪声进行数值模拟,采用非线性谐波法在频域内展开求解非定常扰动项,与叶面定常载荷一同构建类比声源,最后使用 FW-H 积分法进行远场噪声辐射计算。对比数值模拟与试验结果,验证采用非线性谐波法在频域内展开求解非定常扰动项的气动噪声数值模拟方法的有效性,为开式转子的噪声快速评估提供一定的帮助。

1 计算模型与数值方法

1.1 计算模型

开式转子的设计参数参考 NASA 报告[18],转子直径 $D = 0.6$ m,两级转子均为 8 个叶片,级间距离 0.35 m,旋转轴长 2.4 m,75% 叶高处的安装角均为 35°。开式转子几何模型如图 1 所示。

图 1　开式转子几何模型

Fig. 1　Open rotor geometric layout

流场计算时，两级转子各取一个叶片组成单通道计算域，划分六面体结构化网格，计算域如图 2 所示。入口边界至桨中心距离为 1D，出口边界距离桨中心 3D。径向半径取 4D，为 2.4 m。单通道网格如图 3 所示。第一层网格高度为 10^{-6} m，进出口流道数均取 121，叶片区域采用 O 型贴体网格，叶顶间隙采用蝶形网格，叶顶与叶根加密网格，采用 3 重网格技术，网格总量 890 万。边界条件总温 293 K，总压 101.3 kPa。

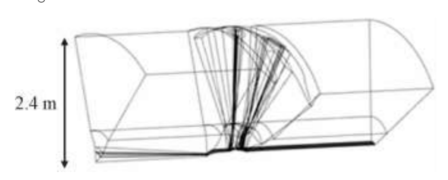


图 2　流场计算域

Fig. 2　The computational domain of flow field

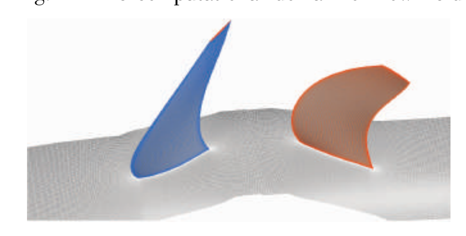


图 3　单通道流场网格

Fig. 3　Single channel flow field mesh

开式转子的噪声主要由厚度噪声和载荷噪声组成[9]。计算噪声时，以叶片固壁面为积分面，由于流场网格尺度足以满足噪声计算的网格要求，可直接采用流场计算时的叶片表面网格，无需局部加密。FW-H 求解时直接重构每个气动变量的值，提取前 3 阶叶片表面静压作为输入，不需要进行任何额外的插值过程。声学网格如图 4 所示。

边界条件采用周期性边界条件，前后排各取一个叶片组成单通道。计算域进口和出口均采用压力边界条件，总压 101.3 kPa，总温 293 K，湍流黏度 0.1 mm/s^2。轴向进气，来流无扰动。噪声传播方向沿每个网格块指向外法线方向。计算远场噪声辐射，需要确定合理的噪声监测点，监测点以声源中心-前级转子旋转中心，为坐标原点，以旋转面正前方5 m处为测点 1，5 m 为半径，画 90°圆弧，每间隔 10°为一个测点。

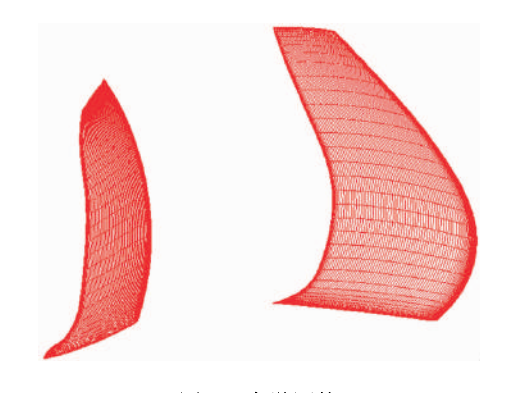


图 4　声学网格

Fig. 4　Acoustic mesh

1.2　计算方法

本研究采用商业软件进行定常和非定常数值模拟。为了适应开式转子相对转动的流场，定常数值模拟需要对守恒形式的 Navier-Stokes 控制方程组[6] 进行时均化处理，速度相关量均采用相对值，即可得到相对直角坐标系下的雷诺平均 N-S 控制方程组，各列向量的具体表达式为

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho\omega_1\\ \rho\omega_2\\ \rho\omega_3\\ \rho E\end{bmatrix},\ \boldsymbol{f}_{Ii}=\begin{bmatrix}\rho\omega_i\\ \rho\omega_i\omega_1+p\delta_{1i}\\ \rho\omega_i\omega_2+p\delta_{2i}\\ \rho\omega_i\omega_3+p\delta_{3i}\\ (\rho E+\rho)\omega_i\end{bmatrix},\ -\boldsymbol{f}_{Vi}=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{i1}\\ \tau_{i2}\\ \tau_{i3}\\ q_i+\omega_j\tau_{ij}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{U}$ 为守恒型变量；$\boldsymbol{f}$ 为离散的对流项；ρ 为密度；E 为总能；ω_i 为速度项；τ_{ij}为应力项。

定常与非定常数值模拟的湍流模型均选取 S-A 模型，转静交接面均采用一维无反射混合面法。

本研究采用非线性谐波法开展非定常数值模拟，其基本原理在于将非定常流场分解为时均流场和扰动流场两部分进行耦合求解。将式(1)中的解向量 $\boldsymbol{U}$ 分解为时间平均值与若干周期性扰动之和，如下式所示。

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{r},t)=\overline{\boldsymbol{U}}(\boldsymbol{r})+\sum\dot{\boldsymbol{U}}(\boldsymbol{r},t) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{r}$ 为位置矢量；t 为时间。每一个周期性扰动基于时间均可分解为 N 阶谐波函数之和，即

$$\dot{\boldsymbol{U}}(\boldsymbol{r},t)=\sum_{k=1}^{N}\tilde{\boldsymbol{U}}_K(\boldsymbol{r})\exp(\mathrm{i}\omega_k t)+\tilde{\boldsymbol{U}}_{-k}(\boldsymbol{r})\exp(\mathrm{i}\omega)-k^l \tag{3}$$

式中,k 为谐波阶数。当 $k=1$ 时,其频率等于叶片的通过频率。阶数越高,对求解的硬件资源需求越大。

为了对时均方程中的确定性应力项进行求解,还需要引入额外的非定常输运方程。详细推导见文献[11]。对于每一个周期性扰动量 $\boldsymbol{U}'$ 均可得到一个相应的扰动输运方程,而对于周期性扰动量的每一阶谐波均可得到其相应的谐波方程为

$$\Omega_i \frac{\mathrm{d}\tilde{U}}{\mathrm{d}t_i} = -\sum_{\Delta s} \tilde{F}_c S + \sum_{\Delta s} \tilde{F}_v S + \Omega_i \dot{Q}_i \tag{4}$$

式中:Ω_i 为网格单元;F_c 为对流项;F_v 为黏性项;s 为面积;Q 为源项。

通过求解上述谐波方程,确定性应力可以直接根据谐波函数值计算得到。对于扰动量 $\dot{f}$ 和 $\dot{g}$,确定性应力计算如下。

$$\overline{f'g'} = \sum_{k=1}^{N} \overline{\dot{f}_k}\,\overline{\dot{g}_k} = \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{2}\left|f_k\right|\left|g_k\right|\cos\phi_{fg} \tag{5}$$

式中,$\left|f_k\right|$ 和 $\left|g_k\right|$ 为扰动量第 k 阶谐波幅值的实部。本研究的开式转子离散噪声,只需计算厚度噪声和载荷噪声。提取前 3 阶谐波的压力和速度,带入改进后的 FW-H 方程[7],则

$$p'(x,t) = -\int_{-\infty}^{\infty}\int_{S(\tau)} \rho_0 v_n(\tau)\frac{D_0 G}{D\tau}\mathrm{d}s(y)\,\mathrm{d}\tau + \int_{-\infty}^{\infty}\int_{S(\tau)} f_j(\tau)\frac{\partial G}{\partial y_j}\mathrm{d}s(y)\,\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

式中:v_n 为叶片的法向速度;f_j 为叶片表面压力。

通过式(3)和式(5)可计算出叶片表面的压力和速度,再联立式(6),便可得出开式转子的远场噪声声压。

2 试验研究

2.1 开式转子试验台

为了在地面声学环境中开展模拟开式转子发动机的噪声试验研究,需要模拟开式转子在起飞初始阶段,发动机面临低转速和低来流速度的特征。设计并研制了开式转子试验台,如图 5 所示。开式转子试验台主要由转子系统、动力驱动系统和控制系统组成。转子叶片几何参数如图 1 所示,与文献[18]一致,试验台设计转速 1 000 r/min。

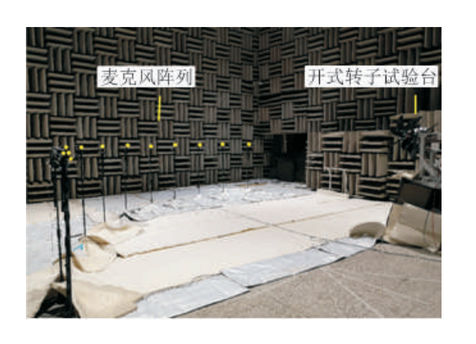


图 5 半消声室噪声测试照

Fig. 5 Test photo of semi-anechoic chamber

2.2 试验方案

本试验在半消声室进行,开式转子试验台位于半消声室前部。试验通过远场阵列测试研究开式转子在 0 ~ 2 000 Hz 范围内的噪声特性,试验现场如图 5所示,麦克风阵列测点示意图如图 6 所示。

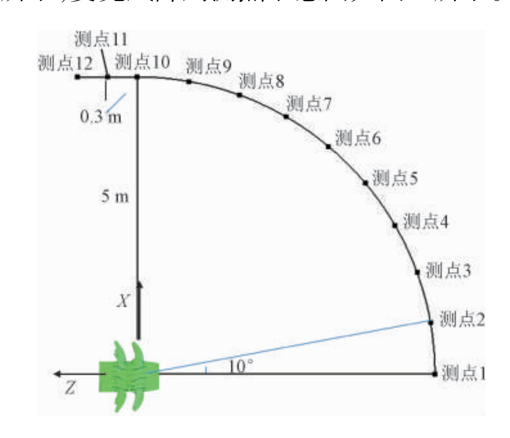


图 6 麦克风阵列测点示意图

Fig. 6 Test points arrangement

如图 6 所示,远场麦克风阵列和开式转子轴线在相同水平面上,以后排转子中心为圆心,半径为 5 m,在 0° ~ 110°的圆弧上均布 12 支自由场传声器,传声器戴防风球,即可获得远场噪声数据。试验时同时连续采集 12 支传声器 30 s 的声压数据,采样频率设为 16 384 Hz,频率分辨率为 0.5 Hz。试验分别测量开式转子在 500 r/min、600 r/min 和 700 r/min 的噪声特性。

3 结果与分析

3.1 数值模拟结果分析

数值模拟了开式转子在 2 000 r/min 的厚度噪声、载荷噪声和总噪声,图 7 和图 8 分别展示了测点

1 ~5 的厚度噪声、载荷噪声频谱图。从图 6 和图 7 中相同频率、相同观测点上可以看到,厚度噪声比载荷噪声小很多。在图 7 中可以看到,厚度噪声在 250 Hz处为 10 dB,同频率下的载荷噪声为 15 dB。从图 8 中可以看出,各离散频率处,测点 1 的声压级最大,测点 2、3、4、5 的声压级依次减小,说明开式转子的远场噪声声压级最大的位置在旋转平面正前方,即与旋转轴线呈 0°位置处。

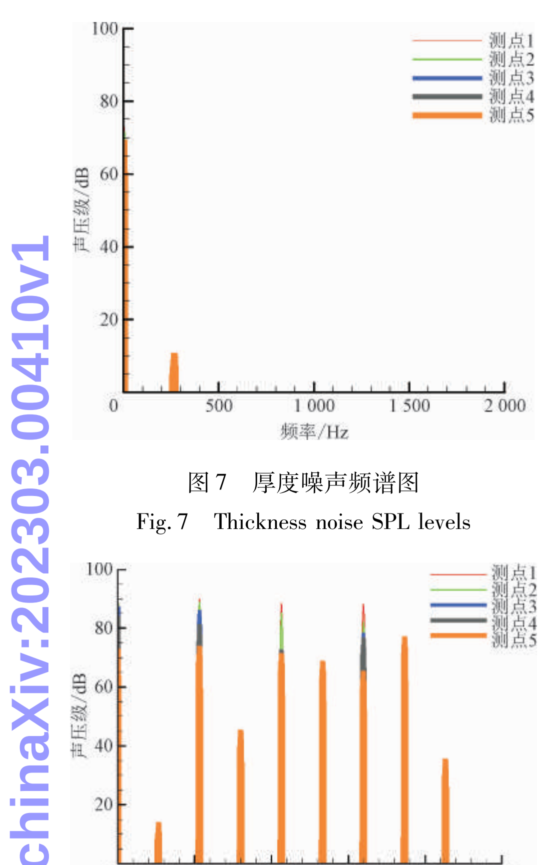


图 7　厚度噪声频谱图

Fig. 7　Thickness noise SPL levels

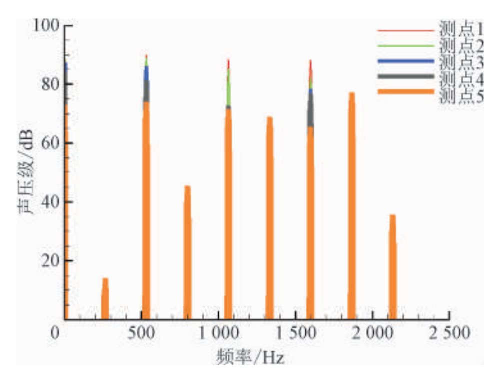


图 8　载荷噪声频谱图

Fig. 8　Loading noise SPL levels

图 9 展示了开式转子在 2 000 r/min 的总噪声,包含厚度噪声和载荷噪声,与图 7 和图 8 对比分析可得载荷噪声占总噪声的绝大部分分量,厚度噪声只在低频区域有少量的贡献。前级转子的通过频率记为 BPF1,后级转子的通过频率记为 BPF2,各转子的谐波频率可记为 $n \times$ BPF,其中 n 为谐波阶数,取正整数。两级转子各阶谐波频率自由组合得到的频率为开式转子的干涉频率[7]。从图 9 中可以看到声压级峰值分布在两级转子的通过频率和干涉频率处。还可以看出,声压级最大的 3 个频率均在干涉频率处。对比可知,干涉噪声声压级较大,是开式转子的主要噪声。

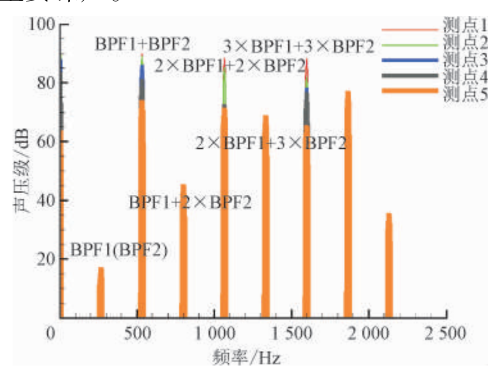


图 9　总噪声声压级频谱

Fig. 9　Total noise SPL levels

3.2　试验结果分析

试验开展了 500 r/min、600 r/min、700 r/min 共 3 个转速工况的远场噪声测试。图 10 展示了开式转子 700 r/min 时部分测点的声压级频谱,在 0 ~ 1 500 Hz的频率范围内,声压级的 3 次幅值均出现在通过频率及其谐波、干涉频率处。也可以看出,各测点的噪声频谱没有被转子通过频率及干涉频率所完全支配,图中出现了很多窄带频谱,宽频噪声明显。这与本次试验处于低来流速度、低转速状态有关。开式转子在此阶段发生了短暂的失速现象,随着飞行速度的增加,翼型气动迎角和来流速度会逐渐匹配,升力也逐步增加。

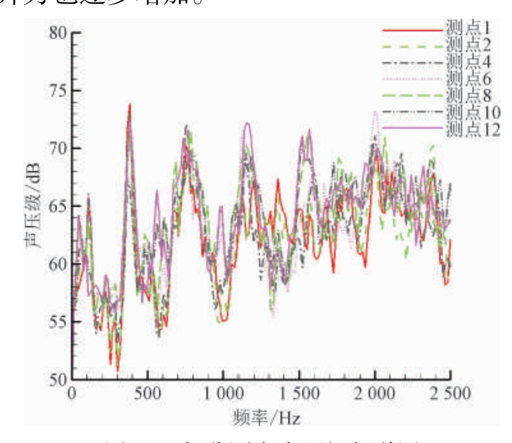


图 10　部分测点声压级频谱图

Fig. 10　SPL levels of some test points

图 11 展示了工况 700 r/min 时,测点 1 测得的噪声频谱图,并与同样条件下的数值模拟结果进行了对比,主要对比了通过频率(BPF1 或 BPF2)、干涉频率(BPF1 + BPF2)、及其干涉频率的谐波(2 × BPF1 + BPF2、2 × BPF1 + 2 × BPF2)4 个关键频率处的结果。可以看出,在关键频率处,数值模拟结果与试验结果趋势基本一致,误差不超过 3 dB,误差值相

对较小，吻合较好。

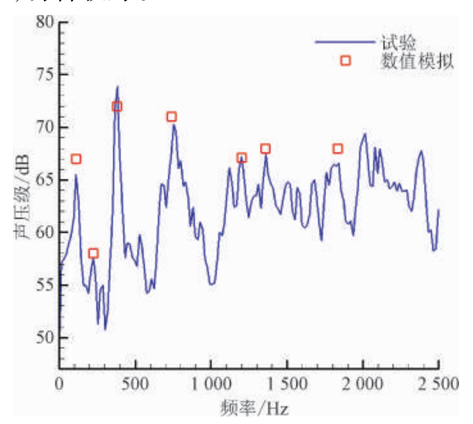


图 11　测点 1 试验仿真噪声结果对比图

Fig. 11　SPL comparison of test and simulation at test point 1

4　结　论

基于非线性谐波法，建立了开式转子噪声预测模型，数值模拟了其离散噪声特性。开展了开式转子远场噪声试验并与预测结果对比，主要结论如下。

1）开式转子的离散噪声主要由干涉噪声组成。干涉噪声主要产生于两级转子的通过频率及其谐波处。

2）关键频率处，数值模拟的开式转子离散噪声与试验值趋势基本一致，误差在 3 dB 以内，满足工程精度要求。

3）形成的从时域求解-频域展开-构建声源项-远场辐射传播的方法链条是有效的，可为后续快速地噪声评估提供帮助。

参考文献

［1］ ZANTE D E V，COLLIER F，ORTON A，et al. Progress in open rotor propulsors：The FAA/GE/NASA open rotor test campaign［J］. Aeronautical journal，2014，118：1181-1213.

［2］ 周莉，是介，王占学. 开式转子发动机研究进展［J］. 推进技术，2019，40（9）：1921-1932.
ZHOU Li，SHI Jie，WANG Zhanxue. Research progress in open-rotor engine［J］. Journal of propulsion technology，2019，40（9）：1921-1932（in Chinese）.

［3］ 严成忠. 开式转子发动机［M］. 北京：航空工业出版社，2016.

［4］ 严成忠. 绿色动力：开式转子航空发动机［J］. 航空科学技术，2013（1）：6-12.
YAN Chenzhong. Green power：Open rotor aero-engine［J］. Aeronautical science & technology，2013（1）：6-12（in Chinese）.

［5］ 金海波，陈宣亮，覃湘桂. 基于 Mohring 声类比的开式转子发动机噪声分析［J］. 航空动力学报，2018，33（4）：785-791.
JIN Haibo，CHEN Xuanliang，Tan Xianggui. Open-rotor engine noise analysis based on Mohring acoustic analogy［J］. Journal of aerospace power，2018，33（4）：785-791（in Chinese）.

［6］ STUERMER A. Unsteady CFD simulations of contra-rotating propeller propulsion systems［C］//Proceedings of the AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Hartford，CT：AIAA，2018.

［7］ ENVIA E. Contra-rotating open rotor tone noise prediction［C］//Proceedings of the AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Atlanta，GA：AIAA，2014：1027-1042.

［8］ WILLIAMS J E F，HAW KINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion［J］. Philosophical transactions of the royal society，1969，264：321-342.

［9］ PARRYA B. Relative importance of open rotor tone and broadband noise sources［C］//Proceedings of the 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Portland，OR：AIAA，2011：1075-1087.

［10］ ADAMCZYK J J. Aerodynamic analysis of multistage turbomachinery flows in support of aerodynamic design［J］. Journal of turbomachinery，2000，122（2）：189-217.

［11］ HE L，NING W. Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines［J］. AIAA journal，1998，36（11）：2005-2012.

［12］ HE L. Fourier methods for turbomachinery applications［J］. Progress in aerospace science，2010，46（8）：329-341.

［13］ VILMIN S，HIRSH C，LORRAIN E，et al. Unsteady flow modeling across the rotor/stator interface using the nonlinear harmonic method［C］//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006：Power for Land，Sea and Air. Barcelona，Spain：ASME，2006：587-597.

［14］ WANG L，LIU B. Furthervalidation of the non linear harmonic method in a subsonic counter-rotating compressor［C］//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012. Copenhagen，Denmark：ASME，2012：1929-1939.

［15］ 王雷，刘波. 非线性谐波法在对转压气机中的校验分析［J］. 航空动力学报，2012，27（7）：1448-1455.
WANG Lei，LIU Bo. Validation of nonlinear harmonic method in dual-stage counter-rotating compressor［J］. Journal of aerospace power，2012，27（7）：1448-1455（in Chinese）.

［16］ 药晓江，董景新，尚捷. 非线性谐波法在叶轮机械非定常计算中的应用［J］. 推进技术，2016，37（4）：632-639.
YAO Xiaojiang，DONG Jingxin，SHANG Jie. Application of nonlinear harmonic in turbomachinery 3D flow field unsteady simulation，2016，37（4）：632-639（in Chinese）.

［17］ COLIN Y，BLANC F，CARUELLE B，et al. Computational strategy for predicting CROR noise at low-speed［C］//Proceedings of the 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Colorado Springs，CO：AIAA，2012：2912-2926.

［18］ WARSI S A. Users guide to pmesh-a grid-generation program for single-rotation and counter rotation advanced turboprops：NASA CR 185156［R］. Cleveland，OH：NASA，1989.

（编辑　黄崇亚）